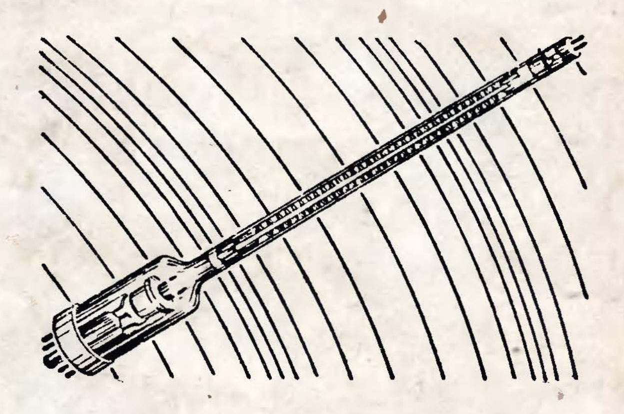
МАССОВАЯ
РАДИО
БИБЛИОТЕКА

А. И. ЗИНЬКОВСКИЙ

ЛАМПЫ БЕГУЩЕЙ и ОБРАТНОЙ ВОЛНЫ





ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 331

А. И. ЗИНЬКОВСКИЙ

ЛАМПЫ БЕГУЩЕЙ И ОБРАТНОЙ ВОЛНЫ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1959 ЛЕНИНГРАД

В брошюре изложены физические основы работы ламп бегущей и обратной волны, в которых осуществляется длительное взаимодействие электромагнитной волны и электронного пучка. Приводятся сведения о практическом использовании ламп в радиоаппаратуре диапазона сверхвысоких частот.

Брошюра рассчитана на подготовленного радиолюбителя.

СОДЕРЖАНИЕ

Зиньковский Абрам Исаакович

ЛАМПЫ БЕГУЩЕЙ И ОБРАТНОЙ ВОЛНЫ

Редактор *Т. И. Изюмова* Техн. редактор *Г. И. Матвеев*

Сдано в пр-во 3/II 1959 г. Подписано к печати 21/III 1959 г.
Бумага 84×108$^{1}/_{32}$ 1,64 п. л. Уч.-изд. л. 1,8
Т-03910 Тираж 50 000 Цена 75 к. Зак. 76

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

СВЕРХВЫСОКИЕ ЧАСТОТЫ

Современная радиотехника овладела чрезвычайно широким спектром радиочастот, простирающимся от единиц килогерц до сотен тысяч мегагерц. Особое внимание привлекают наиболее высокие частоты, обладающие рядом весьма ценных свойств. Чем выше частота, тем легче получить узкий направленный пучок электромагнитных волн, необходимый для хорошего использования мощности передатчика, а также широко применяющийся в радиолокации для обнаружения небольших объектов. Чем выше частота, тем шире полоса пропускания тракта передатчик — приемник, а это означает, что можно осуществить более высококачественную передачу и пропустить более быстродействующую телеграфную запись. На более высоких частотах можно разместить больше каналов связи. На сверхвысоких частотах удается построить рациональные трансляционные линии, предназначенные для передачи многих телевизионных программ и для целей многоканальной связи. Большое будущее принадлежит связи на большое расстояние по волноводам, являющимся неотъемлемой частью техники сверхвысоких частот, причем, как оказывается, наиболее экономичными с точки зрения потерь энергии являются самые высокие частоты.

К диапазону сверхвысоких частот (СВЧ) условно относят электромагнитные колебания с частотами от 300 до 300 000 *Мгц*, т. е. с длиной волн от 1 *м* до 1 *мм*.

При работе в диапазоне СВЧ приходится совершенно отказаться от привычных представлений, укоренившихся в результате практической деятельности в области радиочастот. Так, например, колебательный контур на СВЧ, вместо сочетания катушки самоиндукции и конденсатора представляет собой обычно замкнутый объем, отгороженный от окружающего пространства хорошо проводящими стенками. Поэтому колебательный контур на СВЧ получил название объемного резонатора.

Своеобразны сверхвысокочастотные антенны и линии передачи электромагнитных волн. Антенны вместо проводов, подвешенных на изоляторах, принимают вид акустических рупоров, оптических прожекторов или линз и даже диэлектрических стержней.

Для передачи энергии на малые и большие расстояния на длинах волн короче 10 *см* вместо коаксиальных линий используются пустотелые металлические трубы-волноводы или диэлектрические стержни, также способные при определенных условиях не излучать, а направлять волны.

Волновод в аппаратуре СВЧ подчас выполняет роль соединительного проводника, связывающего один элемент с другим. Так, для передачи колебаний от объемного резонатора к детектору служит отрезок волновода; подчас важную роль играет его длина, причем вариация длины отрезка волновода позволяет изменять характер нагрузки (которую в нашем примере представляет детектор) в месте присоединения ее к резонатору.

Своеобразны и электронные лампы, предназначенные для работы на СВЧ. На СВЧ нельзя не считаться с инерцией электронов, летящих от одного электрода к другому. Пока частота переменного напряжения между сеткой и катодом триода, управляющего движением электронного потока, не очень высока, электроны успевают пролететь расстояние между этими электродами за небольшую долю периода колебаний. На СВЧ, где период колебаний очень мал, время, затрачиваемое на пролет расстояния сетка — катод, становится соизмеримым с периодом изменения напряжения на сетке. Дело доходит до того, что электрон, вылетевший из катода под действием положительного напряжения на сетке, где-то в пути попадает под воздействие напряжения на сетке, успевшего за это время измениться на обратное; в результате вместо того, чтобы пройти сквозь сетку и попасть на анод, электрон возвращается к катоду — работа лампы полностью нарушается. Правда, можно учесть время пролета электроном расстояния между сеткой и катодом и сделав его чрезвычайно малым, обеспечить своевременный пролет электронами сетки. Так и поступают при конструировании триодов, предназначенных для работы на СВЧ. Но это один из возможных и притом нелегких путей. Основное внимание было обращено на поиски других путей, новых принципов конструирования электронных ламп, в основе которых лежало бы устранение или даже использование вредного

в обычных лампах влияния времени пролета. К лампам, построенным по новым принципам, относятся клистрон, лампы бегущей и обратной волны и немалое количество других типов, число которых растет непрерывно.

Для триодов, тетродов и других многоэлектродных ламп характерным является то обстоятельство, что в них электронный поток взаимодействует с постоянным или высокочастотным э л е к т р и ч е с к и м и п о л я м и; переменное магнитное поле сосредоточено вне лампы (в катушке индуктивности колебательного контура), причем возбуждается оно переменным т о к о м.

В клистронах, в лампах бегущей и обратной волны и подобных им типах ламп электронный поток взаимодействует непосредственно с электрической составляющей единого э л е к т р о м а г н и т н о г о п о л я (однако в ряде случаев, например в контуре клистрона, высокочастотные электрическое и магнитное поля могут быть также пространственно разделены). Это важное качественное отличие сверхвысокочастотных ламп накладывает своеобразный отпечаток на их устройство.

ВОЛНОВОДЫ

Для понимания некоторых сторон работы ламп бегущей и обратной волны необходимо кратко напомнить основные особенности волноводов.

Волновод — это устройство, ведущее или, точнее, направляющее электромагнитные волны. В этом смысле, строго говоря, двухпроводная линия, а также и коаксиальная линия тоже могут быть названы волноводами. Но термин «радиоволновод» или, проще, «волновод» закрепился за пустотелыми или заполненными хорошим диэлектриком металлическими трубами произвольного сечения, обычно с хорошо проводящими внутренними поверхностями (особую группу составляют диэлектрические волноводы, которых мы здесь не будем касаться вообще).

В волноводах той или иной формы поперечного сечения может распространяться бесчисленное множество различных типов волн, отличающихся структурой электромагнитного поля. Каждая волна имеет свое обозначение.

Самой удобной для практики оказалась не круглая форма поперечного сечения, а прямоугольная, несмотря на значительно более сложную технологию изготовления труб прямоугольного сечения. Наиболее простой является волна с продольной составляющей магнитного поля. Ее обозна-

чают либо как H_{10}, либо как TE_{10}, т. е. силовые линии электрического поля такой волны целиком лежат в поперечной плоскости.

На рис. 1 приведены картины мгновенного распределения полей волны типа H_{10}. Сплошными линиями изображены электрические силовые линии, пунктиром — магнитные. Чтобы получить достаточно полное представление о волноводе, надо вообразить себе, что картины мгновенного распределения полей бегут вдоль волновода с огромной скоростью.

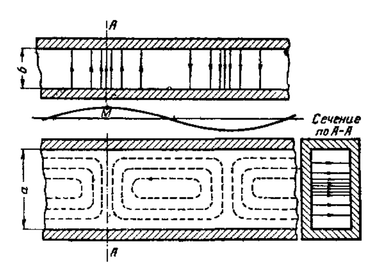


Рис. 1. Мгновенное распределение электрического и магнитного полей в прямоугольном волноводе для волны типа H_{10}.

Скорость распространения точек, в которых колебания имеют определенную фазу, например скорость распространения точки M с максимальным значением напряженности электрического поля, называется **фазовой скоростью**.

Фазовая скорость в волноводе больше скорости света, т. е. скорости распространения радиоволн в свободном пространстве. Ею можно в некоторых пределах управлять, изменяя соотношение между большим размером сечения волновода a и длиной волны в свободном пространстве.

Для того чтобы волна беспрепятственно бежала по волноводу или, как говорят, обладала хорошей бегучестью, помимо размеров, важную роль играет характер нагрузки волновода. Когда волна, распространяясь от источника, доходит до нагрузки, то обычно возникает отраженная волна, которая в большинстве случаев приводит к нарушению нормальной работы волновода или всего устройства, где он используется. Процедура, приводящая к уменьшению отраженной волны и увеличению бегучести, называется **согласованием волновода**.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ БЕГУЩЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ И ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ

Первой лампой, предназначенной для усиления колебаний СВЧ, в которой удалось сильно ослабить вредное влияние времени пролета электронов, явился пролетный клистрон. Но у него выявились крупные недостатки. Во-первых, эффективность взаимодействия электронов с объемным резонатором увеличивается с уменьшением времени пролета электронами зазора между сетками резонатора, выраженного в долях периода колебаний. Во-вторых, наличие в клистроне объемного резонатора, обладающего резко выраженными резонансными свойствами, наблюдающимися в узкой полосе частот, ограничивает область частот, в которой происходит усиление.

Конструкторы радиоламп пришли к заключению, что надо создать такой прибор, в котором было бы обеспечено **длительное взаимодействие электрона с полем**.

Возникла идея сконструировать прибор, в котором электроны длительное время «бежали бы в ногу» с электромагнитной волной, причем для успеха дела надо было обеспечить наиболее длительное совместное движение электронного пучка или электронного сгустка с тем участком электромагнитного поля, в котором напряженность электрического поля вызывала бы торможение электронов. Но возникает серьезная трудность: электромагнитные волны «бегут» со скоростью 300 000 *км/сек*, а скорость движения электронов в обычных вакуумных приборах измеряется сотнями и тысячами километров в секунду. Что касается скоростей движения электронов, соизмеримых со скоростью света, то они достигаются лишь в таких уникальных установках, как ускорители заряженных частиц, используемые в атомной физике. В них, например, электрон приобретает скорость, равную 0,8 скорости света, пройдя электрическое поле с разностью потенциалов около 300 000 *в*!

Как же быть? Как сблизить скорости движения электронов и электромагнитных волн?

Если нельзя увеличить скорость одного движения, то может быть можно выравнять скорости, замедлив более быстрое движение? Уже самые общие рассуждения показали, что такой подход возможен. Хорошо известен, например, такой факт, что в различных средах скорость распространения электромагнитных волн разная, причем она всегда меньше скорости распространения в свободном пространстве.

Но конструкторы не остановились на применении этого способа замедления волны, а придумали искусственные, более удобные для практики способы. Первой из замедляющих систем явилась металлическая спираль.

Если на пути электромагнитной волны протянуть проволоку, то она станет своего рода направляющей, своеобразным волноводом. Теперь совьем из проволоки винтовую спираль постоянного круглого сечения. Электромагнитные волны по-прежнему будут бежать по проволоке, но, очевидно, за время пробега одного витка по оси спирали волна продвинется всего лишь на величину шага спирали. В результате вдоль оси спирали движение получится замедленным во столько раз, во сколько длина витка спирали больше ее шага.

Осталось внутри спирали пропустить электронный поток, подобрать ускоряющее напряжение и создать условия для торможения электронов в искусственно замедленной волне.

Таким образом, вырисовываются контуры нового усилительного электровакуумного прибора, в котором имеются условия для длительного взаимодействия электронов и волны. Применение спирали устранило такой недостаток предшественника лампы бегущей волны — усилительного клистрона, как его узкополосность. Практика показала, что спираль обладает очень слабо выраженными резонансными свойствами, по спирали может распространяться волна в сравнительно широком диапазоне частот.

Новая лампа получила название «лампы бегущей волны»; часто ее сокращенно называют просто ЛБВ.

ЛАМПА БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ

На рис. 2 приведена схема устройства лампы бегущей волны. Источником электронного потока служит электронная пушка, создающая параллельный пучок электронов. На своем длинном пути движения внутри спирали без

принятия особых мер он неизбежно разошелся бы хотя бы из-за взаимного отталкивания электронов. Поэтому возникла необходимость «фокусировки» электронного пучка на всем его протяжении. Она осуществляется, например, продольным магнитным полем, возбуждаемым электромагнитом. Можно осуществить фокусировку также с помощью постоянных магнитов, ферритовых колец, окружающих лампу, или электрическим полем.

Ускоренный высоковольтным электродом пушки сфокусированный электронный пучок летит по оси спирали и попадает на коллектор.

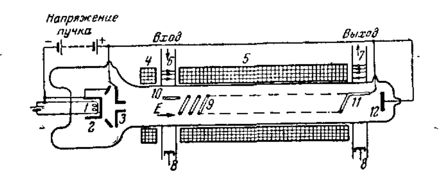


Рис. 2. Схема устройства ЛБВ.

1 — подогреватель; 2 — катод с фокусирующим электродом; 3 — анод или ускоряющий электрод; 4 и 5 — катушки, создающие продольное фокусирующее электронный пучок магнитное поле; 6 — входной волновод; 7 — выходной волновод; 8 — настраивающие поршни, обеспечивающие согласование волноводов; 9 — спираль; 10 и 11 — антенки, связывающие концы спирали с волноводами; 12—коллектор.

Стеклянный баллон лампы помещается в экранирующий проводящий кожух. Спираль вместе с кожухом составляет спиральную линию передачи электромагнитных волн, своеобразный волновод или, как принято называть, линию замедления.

Теперь проследим путь волны. Ближе к электронной пушке расположен входной прямоугольный волновод (на рис. 2 оба волновода изображены в виде продольных сечений). По волноводу поступает подлежащий усилению сигнал. Волновод, как обычно, работает на волне типа H_{10}. Таким образом, линии напряженности электрического поля располагаются параллельно небольшой антенке, являющейся в то же время отогнутым вдоль оси лампы концом спирали. Электромагнитные волны возбудят в антенке токи высокой частоты, они, в свою очередь, возбудят вокруг провода электрические и магнитные поля, которые со скоро-

стью света будут распространяться вдоль провода спирали.

Дойдя до конца спирали, волна возбудит выходную антенку, которая вызовет в выходном волноводе возникновение волны H_{10}.

Оба волновода имеют дополнительные отрезки с металлическими поршнями, которые служат для согласования волноводов с антенками. Пришедшая к антенке волна частично распространяется и к поршню. На поршне произойдет ее отражение. Подобрав длину отрезка волновода изменением расстояния между антенкой и поршнем, можно добиться такого положения, при котором отраженная от поршня волна придет к антенке в фазе с приходящей от источника сигнала волной и «усилит» ее. Подобным же образом работает поршень в выходном волноводе.

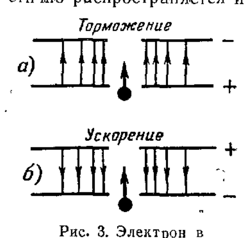


Рис. 3. Электрон в электрическом поле.

Там, где поток электронов входит в спираль, начинается взаимодействие с бегущей по спирали и замедленной до скорости электронов волной. Направление движения электронов всегда одно и то же, слева направо, а направление напряженности электрического поля волны в спирали периодически изменяется во времени с частотой, равной частоте приходящих колебаний.

На рис. 3,*а* схематически изображен случай, когда направления движения электронов и напряженности электрического поля совпадают, а на рис. 3,*б* приведен второй случай, когда оба направления встречны. Так как за направление напряженности электрического поля принято направление движения п о л о ж и т е л ь н о г о з а р я д а, то отрицательно заряженный электрон в первом случае будет, очевидно, т о р м о з и т ь с я, а во втором случае ускоряться.

Итак, если электроны «ныряют» в волну в момент времени, соответствующий рис. 3,*а*, то они начнут тормозиться, а так как скорость электронного потока подбирается немного большей скорости волны, то процесс торможения будет наблюдаться длительное время, на большом пути. Так, например, в ЛБВ, работающей на частоте 4 000 *Мгц*,

этот путь может быть равен 30 *см* (такова длина спирали). Значит, электроны пучка будут длительное время отдавать свою кинетическую энергию, которая будет преобразовываться в энергию электромагнитного поля, т. е. последнее будет у с и л и в а т ь с я. Усиленное поле возбудит в выходном волноводе волну, которая будет значительно сильнее волны, поданной на вход ЛБВ.

Спираль нельзя брать слишком длинной: электроны должны выйти из спирали прежде, чем они выпадут из состояния почти синхронного движения вместе с волной в фазе их торможения.

Другие электроны, влетающие в волну в момент времени, соответствующий рис. 3,*б*, будут ускоряться и сравнительно быстро переходить в область напряженности поля, где их движение начнет тормозиться и, таким образом, кинетическая энергия их также начнет уменьшаться, содействуя усилению. Но в то время, когда электроны ускоряются, они делают это за счет энергии волны, т. е противодействуют усилению. Однако в среднем все же большее число электронов тормозится, а не ускоряется, т. е. в ЛБВ происходит преобразование первоначальной с к о р о с т н о й м о д у л я ц и и электронного потока в так называемую м о д у л я ц и ю п о п л о т н о с т и: электроны группируются, образуется сгусток электронов, длительное время находящийся в тормозящем поле. В результате ЛБВ дает очень высокие коэффициенты усиления, достигающие миллиона раз по мощности в одной лампе.

Процесс усиления можно было бы уподобить нарастанию водяных волн, когда ветер дует им вслед. В ЛБВ электроны движутся несколько быстрее нарастающей волны и образуют род «электронного ветра», который отдает кинетическую энергию при своем движении волне.

Так как усиление в ЛБВ может быть очень большим, то плохое согласование выходного волновода может привести к появлению отраженной волны, которая, вернувшись на вход спирали, отразившись от него и будучи вновь усилена, вызовет самовозбуждение ЛБВ. Для того чтобы сделать усилитель устойчивым, в спиральную линию вводят сильно поглощающую секцию, которую помещают на таком расстоянии от входа, где начинается процесс усиления, или же примерно посередине спирали.

Приведенный на рис. 2 волноводный способ связи ЛБВ с внешней цепью не является единственным. Известны и другие способы связи. Вообще же способ подведения и от-

вода электромагнитных колебаний зависит главным образом от рабочего диапазона частот лампы. Так, начиная с самых низких частот и примерно до 2 000—4 000 *Мгц* связь ЛБВ с внешними цепями осуществляется не с помощью волноводов, которые были бы чрезвычайно громоздкими, а с помощью коаксиальных линий. Известны две разно-

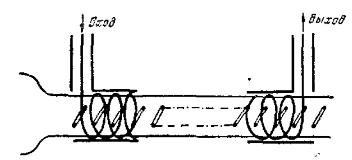


Рис. 4. Схема подключения ЛБВ с помощью связанных спиралей.

видности присоединения коаксиальной линии к ЛБВ, в одной из них замедляющая спираль непосредственно переходит в средний провод линии, а в другой используется так называемый способ связанных спиралей.

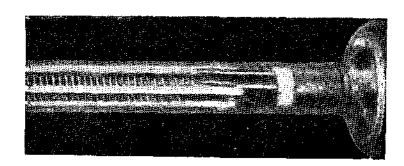


Рис. 5. Участок ЛБВ, предназначенной для работы в диапазоне 4 000 *Мгц* (видны спираль и центрирующие ее керамические стержни).

На рис. 4 приведена схема, поясняющая этот способ. Здесь поверх стеклянного баллона ЛБВ надеваются два манжета, в которых укреплены отрезки спиралей определенной длины, переходящие в средние провода коаксиальных линий. За счет взаимоиндукции осуществляется передача сигнала в замедляющую спираль. Аналогично с помощью выходной спирали усиленное в лампе поле поступает во внешнюю цепь. Поглощающая секция также может быть выполнена в виде связанных спиралей.

Связь с ЛБВ с помощью спиралей, которые можно перемещать вдоль оси лампы, подбирая наивыгоднейшую величину связи и положение поглотителя, за последнее время получает все большее распространение. Но на частотах, превышающих 4 000 *Мгц*, и вплоть до самых высоких почти исключительно применяются волноводы различных сечений.

На рис. 5 приведена фотография участка ЛБВ, примыкающего к электронной пушке.

МОЩНЫЕ ЛАМПЫ И ЛАМПЫ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЕ ДЛЯ РАБОТЫ НА МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛНАХ

В ЛБВ существует оптимальное соотношение параметров спирали, ее диаметра и шага с рабочей длиной волны, причем с повышением частоты усиливаемых колебаний диаметр спирали приходится уменьшать, что при использовании не слишком больших скоростей электронов приводит также к уменьшению шага. При этом возникают большие трудности при изготовлении проволочной спирали, она становится очень тонкой и трудновыполнимой. Так, например, удобная для лампы на 3 000 *Мгц* спираль имеет уже диаметр, равный 3—4 *мм*. Кроме того, при попытках применить спираль для мощных ламп возникает основная и непреодолимая трудность — невозможность рассеять в ней большое количество тепла, а также осуществить необходимое охлаждение.

На миллиметровых волнах, где размеры лампы малы, а к. п. д. их падает, также очень острой является проблема отвода тепла.

Все эти трудности заставили искать новых путей обеспечения длительного взаимодействия электронного пучка и электромагнитной волны. Был предложен оригинальный способ «прерывистого» взаимодействия электронного пучка с пространственной гармоникой. Достигается это следующим образом.

В лампе вместо спирали монтируется сплошной металлический блок, в котором профрезерованы продольные и поперечные пазы. Этот блок является частью волновода, заменившего собой спиральную линию передачи. На рис. 6 приведено устройство лампы. В нижнем левом углу рисунка приведена структура блока с пазами. Из верхнего рисунка и из сечения лампы, приведенного в правом нижнем углу, видно, что между электронной пушкой и коллектором включен волновод с фрезерованной вставкой. Такой

волновод называют «периодической структурой».

По волноводу от входа к выходу распространяется усиливаемая лампой волна. Поток электронов пропускается по продольным пазам.

Если бы не было сделано поперечных пазов, то никакого взаимодействия между электронами и волной не происходило бы, так как поток электронов был бы полностью

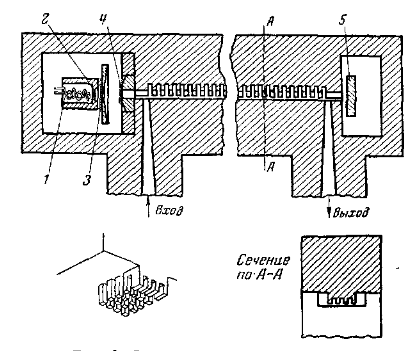


Рис. 6. Схема устройства ЛБВ типа „пространственная гармоника".

1 — подогреватель; 2 — поверхность катода; 3 — управляющая сетка; 4 — ускоряющая сетка; 5 — коллектор.

заэкранирован от волны. Внизу, у выхода продольных пазов, электроны могли бы взаимодействовать с волной, но там они не встречают продольных составляющих поля. Поперечные пазы для того и сделаны, чтобы в них могли образоваться продольные составляющие электрического поля. На рис. 7 приведена картина распределения электрического поля в продольных и поперечных пазах периодической структуры. Электрическое поле, направленное поперек направления движения электронов, по существу, не оказывает на них никакого взаимодействия. Сосредоточим наше внимание на продольных составляющих поля, возникающих в поперечных пазах.

Благодаря распространению по волноводу электромагнитной волны в поперечных пазах возникают продольные

составляющие электрического поля, фаза которых бежит вдоль оси лампы со скоростью, равной фазовой скорости распространения волны в данном сложном волноводе. Эти

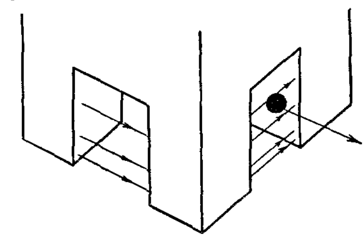


Рис. 7. Поле в продольных и поперечных пазах периодической структуры.

продольные составляющие и обеспечивают прерывистое взаимодействие волны с электронным пучком.

В то время, когда электроны летят между поперечными пазами, они оказываются заэкранированными от поля волны и не испытывают ее воздействия. Когда они пролетают мимо поперечных пазов, наступает взаимодействие.

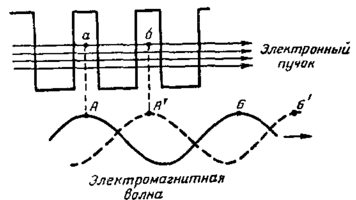


Рис. 8. Схема взаимодействия волны и пучка в ЛБВ с периодической структурой.

На рис. 8 приведена схема взаимодействия волны и пучка. Подобная замедляющая структура обеспечивает гораздо меньшее замедление волны, чем спираль. Поэтому расстояние между поперечными пазами *аб*, называемое периодом периодической структуры, подбирается так,

чтобы при выбранном ускоряющем напряжении, часто называемом «напряжением пучка», за время, которое требуется для перемещения электронов на величину периода, волна успела пробежать расстояние, равное ее длине в волноводе, плюс расстояние *аб*, т. е. волна должна пробежать расстояние $AБ+AA'$. Следовательно, электроны встретятся в соседнем пазу с волной, находящейся в той же фазе, что и в предыдущем пазу. Но теперь электроны взаимодействуют не с «прежней» волной, а с «последующей» Результат будет таков, как будто бы электроны движутся с той

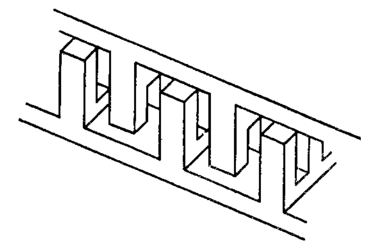


Рис. 9. Периодическая структура типа „встречные штыри".

же скоростью, с какой движется волна. Фактически же скорость электронов может быть значительно меньше фазовой скорости распространения волны в волноводе, меньше во столько раз, во сколько расстояние между пазами (период) меньше суммы длины волны в волноводе и периода структуры.

Явление прерывистого взаимодействия можно уподобить своеобразному стробоскопическому эффекту. Если представить себе, что электрон, пролетая мимо поперечного паза, освещает картину распространения волны, то она будет всегда видна в одной и той же фазе, т. е. будет казаться неподвижной, а не бегущей.

С укорочением длины волны расстояние между пазами становится все меньше и меньше, и точность с которой должен быть выдержан как период структуры, так и ширина пазов, все возрастает. Так, например, в лампе, предназначенной для усиления волн длиной 6 *мм*, при напряжении пучка, равном 1 200 *в*, нормальная работа лампы достигается при расположении на длине 50 *мм* 100 поперечных пазов, ширина которых равна примерно 0,165 *мм*, а глубина 1,42 *мм*. Допустимая погрешность выполнения периода составляет всего 2,5 *мк*.

Конечно, при требовании таких высоких точностей изготовления нет возможности успешно продвигаться в сторону более коротких волн, не прибегнув к каким-то новым

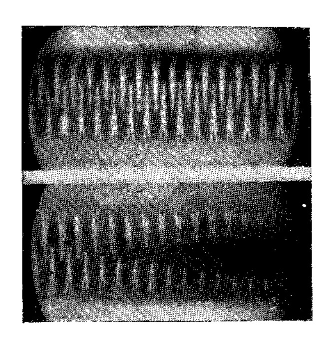


Рис. 10. Витки периодической структуры типа „переплетенная шпилька" (вверху—средний участок, внизу — крайний, сведенный на нет для согласования периодической структуры с волноводом)

ухищрениям, поскольку технологические возможности обработки металлов весьма ограничены. Были разработаны различные виды периодических структур, в которых в какой-то мере обходятся трудности их точного изготовления. На рис. 9 приведена одна из типичных периодических структур, получившая название «встречных штырей». Здесь малый период структуры достигается тем, что одна гребенка точно устанавливается между зубцами другой, ей встречной. На рис. 10 приведена фотография аналогичной периодической структуры, называемой «переплетенной шпилькой».

В последнее время разработана технология изготовления периодических структур, подобная той, которая применяется при намотке сеток электронных ламп.

ПАРАМЕТРЫ ЛАМП БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ

Основная цель, ради которой разрабатывалась ЛБВ,— это получение эффективного усиления колебаний СВЧ в широкой полосе частот.

С помощью триодов с дисковыми впаями или усилительных клистронов при ширине полосы усиливаемых частот в 10 *Мгц* можно получить усиление на каскад, равное 10 *дб*. Если ширину полосы пропускания необходимо расширить до 20 *Мгц*, то усиление падает до 4 *дб*, а при ширине полосы в 32 *Мгц* усиление вообще равняется нулю децибел.

Огромным преимуществом ЛБВ является то, что, например, при средней усиливаемой частоте, равной 2 000 *Мгц*, можно получить ширину полосы пропускания тоже равной или даже большей 2 000 *Мгц*. Другими словами, ЛБВ — почти апериодический усилитель колебаний СВЧ.

Как усилитель ЛБВ характеризуют следующие параметры: 1) усиление по мощности, выраженное в децибелах; 2) ширина полосы пропускания; 3) коэффициент шума, представляющий собой отношение мощности шумов на выходе лампы к мощности тепловых шумов на входе лампы, возникающих в эквивалентном лампе омическом сопротивлении, причем выражается это отношение в децибелах; 4) мощность на выходе; 5) к. п. д.

По назначению или по предъявляемым требованиям ЛБВ можно условно разбить на несколько типов: 1) входные ЛБВ, обладающие малыми собственными шумами; 2) промежуточные ЛБВ, обеспечивающие как можно большее усиление при мощности на выходе до сотен милливатт; 3) ЛБВ средней мощности, отдающие на выходе несколько ватт; 4) мощные ЛБВ, обеспечивающие мощность в десятки и сотни ватт при сравнительно малом усилении и большом к. п. д.

Разработаны маломощные усилительные ЛБВ на частоты примерно от 1 000 до 50 000 *Мгц*. В отдельных участках диапазона частот от 1 000 до 10 000 *Мгц* они могут обеспечить усиление до 50—60 *дб*.

Малошумящие ЛБВ в диапазоне от 1 000 до 3 000 *Мгц* имеют коэффициент шума, равный 5—6 *дб*, а в диапазоне частот от 1 000 до 10 000 *Мгц* 6—9 *дб*. На рис. 11 приведена фотография ЛБВ, предназначенной для работы в диапазоне 5 925—6 425 *Мгц*. В диапазоне частот до 50 000 *Мгц* усиление достигает 20 *дб* при полосе частот 1 500 *Мгц* и выходной мощности более 25 *мвт*.

На рис. 12 приведена фотография одного из типов ЛБВ, предназначенной для усиления в диапазоне 50 000 *Мгц*.

Мощные усилительные ЛБВ в диапазоне частот 1 000—4 000 *Мгц* дают усиление до 35—40 *дб* при мощности до 50 *вт* и к. п. д., равном 10%. В диапазоне частот от 3 000 до 10 000 *Мгц* усиление доходит до 30 *дб*, мощность достигает 5 *вт* при к. п. д., равном 10%.

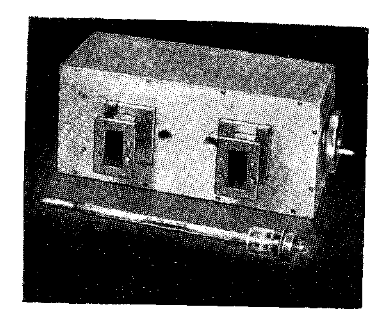


Рис. 11. ЛБВ средней мощности для трансляционных линий и фокусирующая система, выполненная в виде постоянного магнита (мощность на выходе 5 *вт*, усиление 30 *дб*, к. п. д. около 35%, диапазон частот 5 925 — 6 425 *Мгц*).

Имеются мощные импульсные ЛБВ на диапазон частот от 3 000 *Мгц*, где мощность доходит до 10 *Мвт* при усилении 10 *дб*, до 12 000 *Мгц*, где мощность достигает 80 *вт*. Приводятся, например, данные об импульсной ЛБВ, работающей на частоте 2 850 *Мгц*, отдающей 3 *Мвт* при усилении 35 *дб* в полосе пропускания 170 *Мгц* и при к. п. д., равном 34%; длительность импульса равна 2 *мксек*. На рис. 13 приведена фотография этой лампы.

Разработки последних лет показали, что при необходимости усиливать в диапазоне 50—500 *Мгц* мощности 500 *вт* и более наиболее выгодной из всех электровакуумных приборов является ЛБВ.

Из всех ламп, используемых для усиления колебаний СВЧ, ЛБВ, помимо широкополосности, обладает, как мы видели, еще одним выдающимся качеством — самым низким коэффициентом шума. По этой причине она нашла широкое применение в каскадах усиления колебаний СВЧ, ставящихся до смесительного каскада супергетеродинного приемника с целью увеличения его чувствительности. Так, включение на вход приемника радиолокационной станции каскада усиления на ЛБВ эквивалентно увеличению мощности передатчика локатора примерно в 1,6 раза.

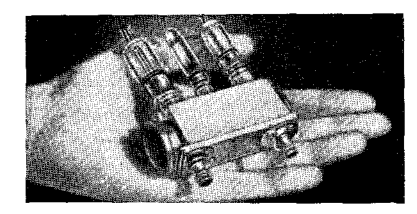


Рис. 12. ЛБВ, предназначенная для усиления в диапазоне 50 000 *Мгц*.

Физической причиной собственных шумов, возникающих в ЛБВ, является быстрое случайное изменение скоростей электронов пучка. В деле уменьшения собственных шумов ЛБВ конструкторы ламп добиваются все новых и новых успехов.

Помимо усилительных функций, ЛБВ может выполнять функции смесителя, умножителя частоты, генератора и ограничителя уровня. Например, опубликована схема ретрансляционной станции с пропускной способностью в 480 телефонных каналов, работающей на частоте 4 050 *Мгц*, в которой одна и та же ЛБВ одновременно используется в качестве усилителя колебаний СВЧ и местного гетеродина, что позволяет обойтись без применения клистронного гетеродина и АПЧ, чем значительно упростить станцию.

На выходе мощных ЛБВ, работающих в нелинейном режиме, кроме основной волны, подлежащей усилению, появляются и ее гармоники. При включении в схему фильтра можно выделить и затем использовать высшую

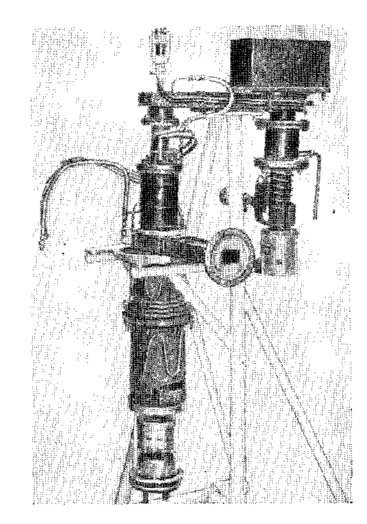


Рис. 13. Мощная разборная импульсная ЛБВ (без катушек магнитной фокусировки луча, сверху присоединен вакуумный насос).

гармонику. Удается получить умножение частоты в десятки раз при мощности гармоники на выходе порядка десятков милливатт.

ЛБВ может служить хорошим ограничителем уровня. Например, при изменении уровня мощности на входе на 20 *дб* мощность на выходе ЛБВ, поставленной в режим ограничения, будет изменяться всего лишь на $\pm 10\%$. Два ограничителя могут дать сглаживание мощности при изменении ее на входе на 40 *дб*. В диапазоне частот порядка 3 000 *Мгц* ограничители работают в полосе частот около 700 *Мгц*.

Чрезвычайно интересным примером разнообразного использования ЛБВ является генерация с ее помощью сверхкоротких импульсов колебаний СВЧ.

ГЕНЕРАЦИЯ СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ

В радиолокации и импульсных системах радиосвязи все более широкое применение находят короткие импульсы электромагнитных волн. В радиолокацин длительность импульса определяет точность, с которой можно измерить расстояние до объекта. В импульсной технике (подобно тому как в технике генерации и приема электромагнитных волн наблюдается неустанное стремление к уменьшению длины волны) также стремятся к уменьшению длительности импульсов. Если в 40-х годах длительность импульсов измерялась микросекундами, то в начале 50-х годов появились описания способов генерации импульсов, длительность которых измеряется миллимикросекундами. Что может дать такая длительность импульса? Например, радиолокатор, работающий на таких сверхкороткнх импульсах, способен различать две цели, отстоящие одна от другой всего лишь на 1 *м* и даже меньше.

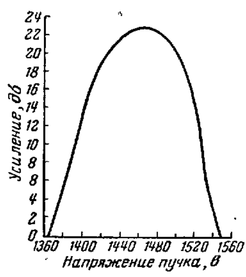


Рис. 14. Зависимость усиления ЛБВ от напряжения пучка.

В качестве примера приведем способ генерации импульсов длительностью в 5 *ммксек* с частотой заполнения (несущая частота), равной 4 000 *Мгц*. Способ основан на критичности зависимости усиления ЛБВ от напряжения луча, т. е. от скорости электронов, так как усиление только тогда и получается, когда соблюдается определенное соотношение между скоростями электронов и волны.

Для генерации сверхкоротких импульсов ко входу ЛБВ, предназначенной для уснления колебаний в диапазоне 4 000 *Мгц*, присоедииянот генератор, работающий в непрерывном режиме на частоте 4 000 *Мгц*. Между спиралью и катодом ЛБВ прикладывается высокое напряжение колебаний на частоте, равной 18,432 *Мгц*. В результате на выходе ЛБВ получаются сверхкороткие импульсы с частотой заполнения 4 000 *Мгц*. Проследим работу всего устройства.

На рис. 14 приведена зависимость усиления ЛБВ от напряжения пучка. Из нее можно установить, что при напряжении пучка, равном 1 460 *в*, усиление достигает максимального значения, а при напряжении пучка, меньшем 1 355 и большем 1 550 *в*, лампа совсем не усиливает. На рис. 15, поясняющем процесс образования сверхкоротких импульсов, внизу прнведена завнсимость напряжения пучка от времени, там же в уменьшенном масштабе относительно оси синусоиды воспроизведен рис. 14. Сверху приведена зависимость выходного сигнала от времени.

ЛБВ начинает усиливать поданный на вход сигнал только тогда, когда напряжение пучка достигает величины E_1. При более низком напряжении лампа заперта. Процесс

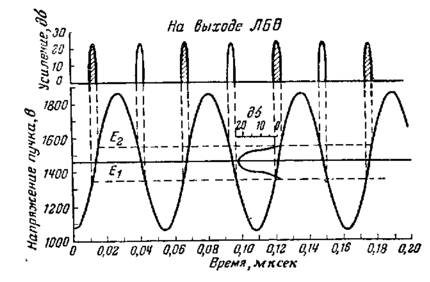


Рис. 15. Способ генерации импульсов длительностью 0,005 *мксек*.

напоминает сеточную модуляцию обычной лампы, а напряжение, прикладываемое между спиралью и катодом, напряжение пучка, аналогично управляющему напряжению на сетке. С повышением напряжения пучка усиление ЛБВ быстро нарастает, увелнчиваясь в сотни раз. Так как частота колебаний напряжения пучка очень высокая, то скоро напряжение пучка достигает величины E_2. Способность усиливать колебания нсчезнет, и лампа снова запрется. После прохождения максимума напряжение пучка снова начнет падать, при этом, когда оно достигнет уровня E_2, ЛБВ опять начнет усиливать; при продолжающемся уменьшении напряжения оно пройдет через значение, соответствующее максимальному усилению, и, изменяясь дальше, дойдет до уровня E_1, вследствие чего усиление станет равным иулю. В результате получаются очень короткие импульсы.

Описанный способ позволяет получать импульсы в широком диапазоне длительностей. Чем больше переменное напряжение пучка, тем уже импульсы, так как ширина каждого импульса отражает то время, за которое приложенное напряжение изменяется примерно на 200 *в*. Можно получить импульсы длительностью 0,001 *мксек*.

ЛАМПА ОБРАТНОЙ ВОЛНЫ

С возникновением новой области радиосвязи, так называемой волноводной связи, а также радиоспектроскопии и других современных средств исследования возникла потребность в генераторах миллиметровых волн и особенно таких, которые можно было бы быстро перестраивать по частоте в широком диапазоне.

Существующие клистронные генераторы миллиметровых волн могут быстро перестраиваться благодаря электронной перестройке. Но диапазон электронной настройки очень невелик — всего 1—1,5% от номинальной частоты.

Работа с ЛБВ, в которой используется периодическая структура, привела к открытию нового принципа генерирования миллиметровых волн. Сравнительно недавно в 1952 г., была предложена новая генераторная лампа, получившая название «лампы обратной волны» или сокращенно ЛОВ. Эта лампа не только является совершенным генератором миллиметровых и сантиметровых волн, но она обладает также самым широким диапазоном электронной перестройки по частоте, не доступным никакому другому из современных типов электронных ламп. В ЛОВ заключена потенциальная возможность получения диапазона перестройки в тысячи и десятки тысяч мегагерц!

ВСТРЕЧНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ

На примере работы ЛБВ мы видели, что при согласном движении потока электронов и электромагнитной волны можно получить усиление последней. А что произойдет, если в ЛБВ волну направить навстречу электронам?

На рис. 16 приведена схема устройства, в котором можно осуществить взаимодействие движущихся навстречу пучка и волны.

По зигзагообразно изогнутому прямоугольному волноводу справа налево распространяется волна типа H_{10}.

В широких стенках волновода просверлены отверстия, сквозь которые пропущен пучок электронов, движущихся слева направо.

Пусть в первой области встречи волны и пучка, обозначенной буквой *а*, электроны попадают в тормозящее поле волны. Тогда, отдавая часть кинетической энергии, электроны усилят волну, и ко второй точке встречи, точке *б*, подойдет волна с большей напряженностью магнитного и электрического поля.

Электроны летят по более короткому пути, чем волна, которая за то же время должна обогнуть одно колено волновода. Если на пролет расстояния между точками *а* и *б*

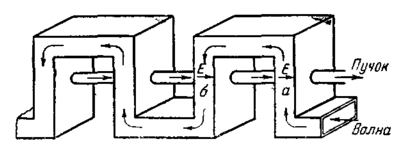


Рис. 16. Взаимодействие обратной волны с электронным пучком в зигзагообразном волноводе.

электроны затрачивают время, равное половине периода колебания волны, то и во второй точке встречи снова будет выдержана необходимая для усиления фаза торможения. В самом деле, если представить сначала, конечно, условно, что направление вектора напряженности поля, обозначенного на рис. 16 буквой *E*, по отношению к стенкам волновода не изменяется во времени, то в области *б* вектор *E* был бы направлен справа налево, навстречу направлению движения электронов, т. е. поле ускоряло бы их движение. Но так как мы имеем дело с переменным полем, причем мы условились, что за время пролета электронами расстояния *аб* пройдет половина периода колебаний, то направление вектора *E* в точке *б* надо изменить на противоположное, т. е. такое, какое приведено на рис. 16. Значит, в точке *б* усиленное поле снова будет тормозить движение электронов, еще больше усиливаться, и так будет происходить во всех остальных точках встречи. Мы получим эффект ступенчатого усиления, эффект прерывистого взаимодействия пучка и волны.

Но в отличие от согласного движения волны и пучка при встречном движении имеет место новая особен-

ность — образование распределенной по всей длине лампы обратной связи.

Что же служит каналом обратной связи? Под каналом обратной связи обычно подразумевают участок замкнутого контура, по которому переменное напряжение или, как в нашем случае, переменное электромагнитное поле после усиления может снова попасть на вход усилителя.

Оказывается, при встречном движении пучка и волны электронный пучок служит не только источником энергии, обеспечивающим усиление, но и образует также канал обратной связи.

В точке *б* электроны будут тормозиться, на пути *аб* их догонят более быстрые электроны, вследствие чего образуется сгусток электронов. В те моменты времени, когда мимо электронного пучка пробегает волна, ускоряющая электроны, они начнут нагонять заторможенные электроны. Итак, быстрые электроны стремятся сгруппироваться вокруг медленных. В электронном пучке образуются сгустки электронов, которые будут перемещаться по пучку. Помимо бегущей справа налево электромагнитной волны в лампе возникает волна плотности пространственного заряда, бегущая слева направо, которая и служит каналом обратной связи. Комбинация пучка и волны образует контур обратной связи.

Из радиотехники высоких частот мы знаем, что если в усилителе имеется контур обратной связи, то усилительный каскад может самовозбудиться и превратить усилитель в автогенератор, для этого надо лишь, чтобы усиление компенсировало потери.

То же самое происходит и на сверхвысоких частотах в ЛБВ, в которой осуществлено встречное движение волны и пучка. Пока ток пучка в ЛБВ с встречным движением меньше определенной критической величины, лампа усиливает электромагнитные сигналы на частоте, определяемой напряжением пучка. При этом будет наблюдаться преимущественное усиление той волны, которая укладывается в контуре обратной связи целое число раз. Уже из этого обстоятельства видно, что ЛБВ с встречным движением, т. е. ЛОВ, не может обеспечить усиление в широкой полосе частот.

В усилительном режиме как в ЛБВ, так и в ЛОВ напряжение луча не изменяется, поэтому усиление зависит от фазовой скорости волны, а она, в свою очередь, определяет ширину полосы частот. Если фазовая скорость от частоты

мало зависит, то, как это имеет место в ЛБВ, мы получим широкополосный усилитель. В ЛОВ фазовая скорость сильно зависит от частоты, что обусловливает узкополосность ЛОВ как усилителя. На рис. 17 приведены зависимости фазовой скорости прямой и обратной волны от частоты. Из рис. 17 видно, что для прямой волны существуют условия, благоприятные для длительного взаимодействия электронов с волной в широком диапазоне частот. Фазовая скорость обратной волны имеет резкую зависимость от частоты.

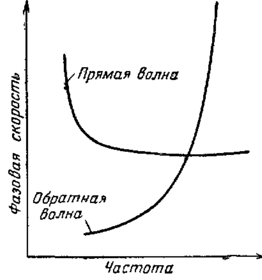


Рис. 17. Зависимость фазовой скорости прямой и обратной волны от частоты.

Усилительный режим не является целью создания ЛОВ. Поэтому посмотрим, что произойдет после прохождения критического значения тока луча (аналогия с переходом порога генерации в регенераторе), т. е. того значения, при котором усиление в контуре обратной связи начинает превышать потери. Конечно, лампа загенерирует на той частоте, которую перед этим усиливала. Ток, соответствующий переходу от усилительного режима к генераторному, называют «п у с к о в ы м».

Выпускаемые промышленностью ЛОВ строятся не по схеме рис. 16, приведенной лишь для пояснения принципа работы, а с использованием волноводов с периодическими структурами и принципом прерывистого взаимодействия пространственной гармоники и пучка.

На рис. 18 приведена схема взаимодействия пучка и обратной волны. При встречном движении электроны проходят расстояние между соседними пазами за время, которое необходимо на распространение одной волны без отрезка *АА'*.

На рис. 19 приведена схема контура обратной связи, образуемого совокупностью пучка и электромагнитной волны.

Теперь проследим, как осуществляется электронная перестройка ЛОВ. Частота генерации колебаний в ЛОВ

зависит от расстояния между пазами, фазовой скорости распространения электромагнитной волны и от скорости электронов. С изменением напряжения пучка изменяется скорость электронов и, следовательно, время, затрачивае-

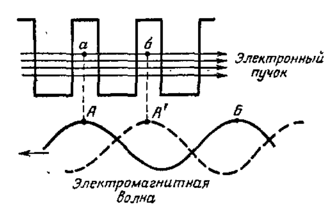


Рис. 18. Схема взаимодействия волны и пучка в ЛОВ.

мое на их движение от паза к пазу. Если бы контур обратной связи по-прежнему содержал целое число длин волн, то время, затрачиваемое на прохождение волной пути, равного $АБ—АА'$, изменилось бы. Но генерация только тогда

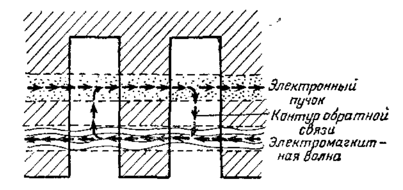


Рис. 19. Схематическое представление контура обратной связи — совокупности пучка и электромагнитной волны.

и будет возникать, когда контур обратной связи содержит целое число волн, иначе не получится положительной обратной связи. А что означает изменение времени, затрачиваемого волной на прохождение определенного пути? Поскольку расстояние между пазами величина постоянная, это означает не что иное, как изменение частоты колебаний. Несколько усложняет всю картину изменение фазовой

скорости волны от частоты, но принцип электронной перестройки ЛОВ от этого не изменяется.

На рис. 20 приведена типичная зависимость изменения частоты колебаний ЛОВ от изменения напряжения пучка, снятая для лампы с периодической структурой типа «переплетенная шпилька». Эта структура напоминает структуру типа встречные штыри, но вместо штырей в ней смонтированы проволочные молибденовые петли. Поскольку для ЛОВ, предназначенных для работы на миллиметровых волнах, требуемое расстояние между «пазами», зазорами между петлями составляет сотые доли миллиметра при точности выдерживания их порядка микрон, то подобные периодические структуры изготовляются с применением предварительной намотки проволоки на станке, предназначенном для изготовления сеток радиоламп.

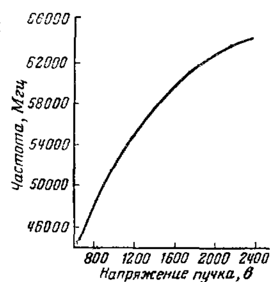


Рис. 20. Зависимость частоты колебаний ЛОВ от напряжения пучка.

Выше мы молчаливо предполагали, что колебания в ЛОВ уже каким-то образом возникли и поддерживаются благодаря положительной обратной связи. Но откуда взялась обратная волна в момент включения лампы? За счет чего появилась группировка электронов, изменившая состояние волновода?

Практика работы с электровакуумными приборами давно навела на мысль, что электронный пучок, к каким бы мы уловкам ни прибегали, нельзя считать строго постоянным во времени. В нем всегда непременно имеется быстро и случайно изменяющаяся переменная составляющая. Исследования показали, что переменная составляющая состоит из бесчисленного множества синусоидальных колебаний, имеющих случайное распределение по частоте как амплитуды, так и фазы. Значит в электронном потоке ЛОВ также есть переменная составляющая, причем в ней обязательно найдутся такие колебания, которые соответствуют диапазону частот нашей ЛОВ. Все это означает, что электронный пучок в ЛОВ помимо нашего желания

уже в момент включения лампы содержит составляющую, в которой можно обнаружить группировку электронов. Как бы ни была слаба эта группировка, она вызовет появление двух волн, распространяющихся в волноводе в противоположных направлениях. Прямая волна будет затухать, а обратная волна за счет положительной обратной связи начнет усиливаться, черпая энергию из пучка. Возникнут незатухающие колебания той частоты, которая соответствует периоду периодической структуры, напряжению пучка и фазовой скорости волны. Если выключить лампу, изменить напряжение пучка и снова включить ее, то лампа самовозбудится уже на другой частоте, соответствующей изменившемуся напряжению пучка. Если же выключить лампу и, уменьшив ток пучка ниже пускового значения, снова ее включить, то колебания не возникнут. Лампу можно заставить генерировать вновь лишь путем увеличения тока пучка до пускового значения.

ПАРАМЕТРЫ ЛАМП ОБРАТНОЙ ВОЛНЫ

В настоящее время серией ЛОВ можно перекрыть диапазон частот от 400 до 200 000 *Мгц*. В диапазоне частот от 3 000 до 10 000 *Мгц* мощность ЛОВ достигает 0,1 *вт* при к. п. д. менее 3%. В диапазоне частот от 10 000 до 83 000 *Мгц* мощность доходит до десятков милливатт при к. п. д. менее 1% и полосе электронной перестройки до 30%. В диапазоне частот от 83 000 до 106 000 *Мгц* мощность доходит до 25 *мвт* при к. п. д. около 1% и полосе электронной перестройки 8—11%.

Выпускаются также ЛОВ с узким диапазоном электронной перестройки порядка 1—2% с повышенной мощностью при к. п. д. 1—4%; в диапазоне частот от 35 000 до 46 000 *Мгц* достигнута мощность порядка единиц ватта. На отдельных участках диапазона СВЧ достигнуты лучшие показатели. Так, например, в диапазоне частот от 7 500 до 15 000 *Мгц* ЛОВ отдает от 20 до 1 500 *мвт*. Созданы ЛОВ, дающие на более низких частотах 390—1 550 *Мгц* в непрерывном режиме 5—10 *квт*.

В диапазоне частот от 1 550 до 5 200 *Мгц* в импульсном режиме ЛОВ может давать до 150 *квт*.

Имеется сообщение о разработке экспериментальной ЛОВ с мощностью в 1 000 *Мвт*.

Часто в литературе можно встретить иное название лампы обратной волны, ее называют «карсинотроном», «карсинотроном типа О», или «карсинотроном типа М». Слово «карсинотрон» — это французское фирменное название ЛОВ, а различие типов О и М состоит главным образом в расположении внешнего фокусирующего магнитного поля по отношению к направлению электронного пучка.

ЛОВ находит применение в качестве гетеродинов супергетеродинных приемников, в качестве генераторов, особенно миллиметрового диапазона, и главным образом в таких случаях, когда нужна быстрая, т. е. электронная, перестройка генератора по частоте. Когда надо выполнять какие-либо исследовательские работы по изучению спектра поглощения различных газов или производить настройку волноводных трактов, предназначенных для работы в широком диапазоне частот, или осуществлять систему связи с быстрой сменой длин волн, ЛОВ является незаменимым прибором.

При использовании ЛОВ в качестве источника мощных колебаний считается целесообразным применять ее тогда, когда требуемая мощность превышает 50 *вт*. При меньшей мощности использование вместо ЛОВ магнетрона с электронной перестройкой в качестве задающего генератора и ЛБВ в качестве усилителя мощности дает выигрыш в габаритах и весе.

ЛОВ — в основном лампа миллиметрового диапазона, именно на этих волнах она отдает наибольшую мощность в сравнении с клистроном или ЛБВ, кроме того, она сравнительно проще в изготовлении, чем другие лампы.

Помимо своих частотных свойств и способности быстро перестраиваться электронным путем в широком диапазоне частот, ЛОВ в сравнении с клистроном или магнетроном имеет еще одно большое преимущество: частота колебаний ЛОВ почти не зависит от изменения полного сопротивления нагрузки. Это избавляет от необходимости введения между генератором и нагрузкой развязки, которая обычно является дополнительным потребителем полезной мощности, понижающим фактический к. п. д. лампы.

В передатчиках, работающих на ЛОВ, можно осуществить как амплитудную, так и частотную модуляцию, причем амплитудную модуляцию получают путем изменения тока пучка, а частотную, естественно, путем изменения напряжения пучка, как мы знаем, непосредственно изменяющего частоту колебаний.

Большой интерес может представлять использование ЛОВ в несвойственном ей усилительном режиме. В таком режиме при токе пучка, равном 50—70% от пускового, можно построить микроволновый усилитель с большим коэффициентом усиления, который может со скоростью в несколько миллионов раз в секунду скользить по частоте в широком диапазоне. При этом благодаря острой зависимости усиления от частоты усилитель может с высокой степенью отстройки различать два сигнала, очень мало отличающихся по частоте. Такая схема использования ЛОВ открывает широкие возможности осуществления многоканальных систем связи с огромным количеством каналов.
